

文章编号: 2095-4980(2018)06-1022-06

基于特征辅助的灰色航迹关联方法

李爽爽, 王志诚, 肖金国, 李 芬, 李梦妍, 李鸿志

(上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘 要: 多雷达多目标航迹关联算法大多量测数据中因信息贫瘠的原因导致雷达目标航迹关联精确度较差、性能较低等一系列问题。基于灰色关联分析理论的航迹关联算法, 分析研究了综合性线段Hausdorff距离(LHD)灰色关联方面的理论, 并将其用在雷达航迹关联领域。通过仿真证明, 该算法能够综合考虑航迹之间的距离远近度和2条航迹曲线的拟合度。特征辅助信息不仅可以用于数据关联, 也可以用在航迹关联方面。提出基于目标特征辅助信息的序贯灰色关联算法, 仿真证明该算法与传统灰色关联算法相比精确度较高, 能够在工程实践中提高关联概率。

关键词: 灰色关联; 航迹关联; 特征信息; 雷达目标跟踪; 杂波环境

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.1022

Grey track correlation method based on feature assistance

LI Shuangshuang, WANG Zhicheng, XIAO Jinguo, LI Fen, LI Mengyan, LI Hongzhi

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: For multiple radar target track correlation algorithm, the barren information in most measurement data leads to many problems including poor accuracy of radar target correlation and the low performance. According to the track correlation algorithm based on the theory of grey correlation analysis, the comprehensive Line segment Hausdorff Distance(LHD) grey correlation theory is analyzed and applied in the field of radar correlation. The simulation proves that the algorithm can comprehensively consider the distances among different tracks and the curve fitting for two tracks. Feature auxiliary information can not only be used for data association, but also for track association. In this paper, sequential grey association algorithm based on target feature auxiliary information is proposed. Simulation indicates that this algorithm has higher accuracy compared with traditional grey association algorithm and can improve the correlation probability in engineering practice.

Keywords: grey association; track association; feature information; radar target tracking; clutter environment

雷达处于杂波环境下多目标跟踪状态时, 多传感器接收雷达回波时会存在航迹关联问题, 它与接收到的回波来源息息相关。自 1971 年 Singer 和 Kanyuck 提出了关于航迹关联的问题后, 航迹关联算法就成为很多学者的研究热点, Singer 等提出了门限法和加权航迹关联算法, 而这 2 种方法适用于稀疏的杂波环境下; 后来何友教授等将模糊算法概念引入航迹关联领域, 该方法较好地处理了密集回波航迹关联问题, 但是会出现系统误差被忽略的情况。现有的航迹关联理论包括模糊关联理论、随机集理论、多假设跟踪方法等等。进入 20 世纪 90 年代, 航迹关联作为目标跟踪系统领域里非常重要的一部分受到越来越多学者的关注。

1982 年, 邓聚龙教授提出灰色系统理论, 将现有的少量数据分析处理, 尽可能获取最大的有用信息量, 并将其用于研究系统内部规律^[1]。灰色关联分析来自灰色系统, 它是根据各类信息元素的紧密度判断出它们的关联状态。当前关于雷达无源传感器扫描到的回波关联问题主要是在空间上对回波进行关联, 使用了目标信号的到达时间或者到达方向, 即利用了目标的位置和方位角度等信息^[2]。而在对回波数据的关联问题上较少使用雷达扫描到的目标特征信息, 比如目标幅度信息、目标多普勒信息、载频、脉宽等特征信息进行航迹关联。不同目标的回波量测中的特征信息有可能会有相似性, 而同一目标的回波量测中由于测量误差的存在也会导致特征信息的差异性,

这就导致了雷达传感器扫描到的量测与目标的关联存在模糊性^[3]。本文提出特征辅助的灰色航迹关联算法能够完全发挥回波中特征信息的作用，使航迹关联简单准确。

1 灰色关联分析算法

理论上，雷达目标跟踪时雷达扫描到同一目标的回波数据中运动参数和其他特征参量都是相同的，但由于杂波、噪声干扰的影响，雷达扫描同一个目标时提取到的信息会存在差异，但是雷达扫描若干个目标时提取到的信息反而在某些情况下可能会相似，这种情况将会在一定程度上增大航迹关联难度，而且还会增强系统模糊性。灰色关联分析因为其不要求信息量和分布情况的优势，在目标跟踪关联领域得到重视。

灰色系统理论是把整体系统分解成许多子部分，然后利用某些技术弄清每个子部分间的紧密度。灰色关联分析方法采用线性插值使观测信息成为一小截的折线，然后使用曲线拟合的方法获得比较系统和参考系统之间的紧密度关系^[4]。灰色关联分析方法被提出后，许多专家学者对其模型、构造特点及其性质进行深入研究。灰色关联度作为最基本元素，用来构造判断序列关联度。实现灰色关联分析法的步骤为：首先要构建关联模型、参考序列和比较序列，然后计算关联系数，最后将关联度排序^[5]。

令 X_i 为系统因素，则 X_i 为 k 上的观测集合 $x_i(k)$ ， $k=1,2,\dots,n$ ，即：

$$X_i(k) = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) \quad (1)$$

当 k 表示观测对象序列、离散时间、指标时， $X_i(k) = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ 表示 k 上的系统行为，将其做灰色关联分析处理时各因素随着 k 的变化而变化，造成系统灰色关联度也随之而变化。

灰色关联分析法的实现步骤为^[5]：

1) 确定参考序列、比较序列，其中比较序列作为观测对象行为序列特征集合，而参考序列作为系统行为序列特征。

2) 对系统参考序列、比较序列予以消除量纲。

3) 获取参考序列、比较序列两者之间的关联度。

本文给出了代表性相似性关联度——邓氏关联度，令系统参考数列表表达式为 $X_0 = \{x_0(j) | j=1,2,\dots,m\}$ ，假设比较数列为 $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，即 $X_i = \{x_i(j) | j=1,2,\dots,m\}, i=1,2,\dots,n$ ，则系统的参考序列与每一个比较序列之间的关联系数 ξ_{0i} 计算如下：

$$\xi_{0i}(j) = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta_{0i}(j) + \rho\Delta(\max)} \quad (2)$$

式中： $\Delta_{0i}(j) = |x_0(j) - x_i(j)|$ ； ρ 为分辨系数，取值范围为 $0 \sim 1$ ，令 $\rho=0.5$ ， ρ 取值越小，辨别能力越高，通常 ρ 值随具体情况而变化； $\Delta(\max) = \max_i \max_j |x_0(j) - x_i(j)|$ 为两级最大差值； $\Delta(\min) = \min_i \min_j |x_0(j) - x_i(j)|$ 为两级最小差值。

4) 计算灰色关联度

由上述步骤可知， $\xi_{0i}(j)$ 为每个比较序列在不同的特征参量或时刻上与参考序列的关联程度，因此会出现大量的关联系数，从而造成信息量无法集中，不利于对系统整体分析。为了高效探讨整体系统，需将全部的关联系数聚合，即产生灰色关联度。

令参考序列、比较序列间的关联度为 $\gamma(X_0, X_i)$ ，即 γ_{0i} 。由于各特征所占重要性不同，可导致特征指标的权重的分配也不均。

令 $a(j)$ 为比较序列中各个特征指标的权重，表明各项指标的相对重要性，其具体数值的分配可由具体情况而定，且 $\sum_{j=1}^m a(j) = 1$ ， $a(j) \geq 0$ ，则加权灰色关联度为：

$$\gamma_{0i} = \sum_{j=1}^m \xi_{0i}(j) a(j) \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

2 基于多特征参数的灰色关联矩阵

假设存在 m 个探测系统和 n 个目标，每一个回波中存在 l 个特征参数组成该量测的特征向量，设：

$U_1 = \{1,2,\dots,m\}$ ， $U_2 = \{1,2,\dots,n\}$ ， $U_3 = \{1,2,\dots,s\}$ 。 U_1, U_2, U_3 为 n 个目标、 s 个特征参数、 m 个探测系统的有序集

合。任意 $i \in m, j \in n, k \in s$, 第 j 个目标和第 k 个参数有 n_{jk} 个量测值, 从而得出目标 j 的全部参量为 $\prod_{k=1}^s n_{jk}$ 个, 那么 $\sum_{j=1}^n \left[\prod_{k=1}^s n_{jk} \right]$ 为回波的全部参量数目^[6]。

n 个目标组成集合 T , 则:

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_l, \dots, T_n\} \quad (4)$$

对于每一个目标 T_l 而言, 它是将每一个探测系统获得的特征属性集合, 所有的特征向量可以整合成关联向量集^[7], 则:

$$\mathbf{X} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}^1 = \{X_1^1, X_2^1, \dots, X_l^1, \dots, X_n^1\} \\ \mathbf{X}^2 = \{X_1^2, X_2^2, \dots, X_l^2, \dots, X_n^2\} \\ \vdots \\ \mathbf{X}^m = \{X_1^m, X_2^m, \dots, X_l^m, \dots, X_n^m\} \end{array} \right\} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{X} = \{X_j^i(k) | i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, s\}$, $X_j^i(k)$ 为第 i 个探测系统在第 j 个目标的第 k 个特征参数^[8]。

假设 m 个雷达均扫描到 n 个目标, 且这些回波都是由 s 个参数组成的特征向量, 而全部的特征向量都能够组合成关联向量集 $\mathbf{X}$, 见式(5)。向量集 $\mathbf{X}$ 中的这些向量组本身既可以被当作参考序列, 又可以被当作比较数列。传感器 i 与传感器 j 对于第 k 个特征参数之间的关联系数 $\xi_{ij}(k)$ 为:

$$\xi_{ij}(k) = \frac{\min_i \min_j \min_k |X_i(k) - X_j(k)| + \rho \max_i \max_j \max_k |X_i(k) - X_j(k)|}{|X_i(k) - X_j(k)| + \rho \max_i \max_j \max_k |X_i(k) - X_j(k)|} \quad (6)$$

灰色关联系数为系统的每一个比较序列在任意时刻或特征属性方面与系统相对应的参考序列关联程度, 因此会出现相互交叉的大量关联值, 从而导致信息量无法集中而不适合整体系统的分析比较。为了便于分析, 需将灰色关联系数整合, 产生灰色关联度^[9]。令 $a(k)$ 表示各个特征参数之间权重, 表明各项指标的相对重要性, 其具体数值的分配可由具体情况而定, 其中 $k=1, 2, \dots, s$, 且 $a(k) \geq 0$, 则传感器 i 与 j 的灰色关联度为: $\gamma(X_i, X_j) =$

$$\sum_{k=1}^s \xi_{ij}(k) a(k), \quad k=1, 2, \dots, s, \quad \text{其中} \quad \sum_{j=1}^m a(k) = 1。$$

因此雷达传感器 i 与雷达传感器 j 的灰色关联度矩阵为:

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma(X_1, X_1) & \gamma(X_1, X_2) & \cdots & \gamma(X_1, X_{mn}) \\ \gamma(X_2, X_1) & \gamma(X_2, X_2) & \cdots & \gamma(X_2, X_{mn}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(X_{mn}, X_1) & \gamma(X_{mn}, X_2) & \cdots & \gamma(X_{mn}, X_{mn}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 基于特征信息的修正灰色航迹关联算法

一般灰色关联算法在将参考、比较序列消除掉量纲后会采取区间值化途径, 但是该过程同时也会消除掉参量间的联系, 而该联系却能够在航迹关联算法中起到非常重要的作用, 因此求取灰色关联度时应取消无量纲标准化处理, 直接计算雷达传感器 i, j 对于第 k 个特征参数之间的序列绝对差 $\Delta_{ij}(k)$, 即: $\Delta_{ij}(k) = |X_i(k) - X_j(k)|$ 。假设 $\Delta_{ij}(k)$ 是在 t 时刻求取到的序列绝对差, 则 $\Delta_{ij}(k)$ 也可以写成 $\Delta_{ij}(k, t)$ 。 $\Delta_{ij}(k, t)$ 是指仅仅在 t 时刻序列之间的绝对差且并没有先验信息, 这将会影响航迹关联的精确性, 于是本节在提出基于特征信息的灰色航迹关联算法时加入了先验信息。

令雷达传感器 i, j 对于第 k 个特征参数在 $t-1$ 时刻之间的序列绝对差为 $\Delta_{ij}(k, t-1)$, 修正后的 t 时刻的序列绝对差为 $\hat{\Delta}_{ij}(k, t)$, 则 $\hat{\Delta}_{ij}(k, t) = \Delta_{ij}(k, t) + \hat{\Delta}_{ij}(k, t-1)$ 。假设特征参数 $X_i(k, t)$ 和 $X_j(k, t)$ 的真实特征参数值为 $X_i^0(k, t)$ 和 $X_j^0(k, t)$, 误差分别为 $\tilde{X}_i(k, t)$ 和 $\tilde{X}_j(k, t)$, 则 $\tilde{X}_i(k, t) = X_i(k, t) - X_i^0(k, t)$, $\tilde{X}_j(k, t) = X_j(k, t) - X_j^0(k, t)$ 。令在 t 时刻雷达传感器 i 与雷达传感器 j 对于第 k 个特征参数的真实差值 $d_{ij}(k, t)$ 为:

$$d_{ij}(k, t) = X_i^0(k, t) - X_j^0(k, t) \quad (8)$$

$$\Delta_{ij}(k) = |X_i(k, t) - X_j(k, t)| = |X_i^0(k, t) + \tilde{X}_i(k, t) - X_j^0(k, t) - \tilde{X}_j(k, t)| = |d_{ij}(k, t) + \tilde{X}_i(k, t) - \tilde{X}_j(k, t)| \quad (9)$$

则修正后的 t 时刻的序列绝对差 $\hat{\Delta}_{ij}(k, t)$ 为：

$$\hat{\Delta}_{ij}(k, t) = \hat{\Delta}_{ij}(k, t-1) + |X_i(k, t) - X_j(k, t)| = \sum_{u=1}^t |d_{ij}(k, u) + \tilde{X}_i(k, u) - \tilde{X}_j(k, u)| \quad (10)$$

通常雷达扫描到回波误差满足正态函数分布，即 $E[\tilde{X}_i(k, t)] = 0$ ， $E[\tilde{X}_j(k, t)] = 0$ ， $D[\tilde{X}_i(k, t)] = \sigma_i^2(k, t)$ ， $D[\tilde{X}_j(k, t)] = \sigma_j^2(k, t)$ 。 $d_{ij}(k, t) = \tilde{X}_i(k, t) - \tilde{X}_j(k, t)$ 满足 $N(d_{ij}(k, t); \sigma_{ij}(k, t))$ 分布，其中 $\sigma_{ij}(k, t) = \sqrt{\sigma_i^2(k, t) + \sigma_j^2(k, t)}$ 。

由修正后的序列绝对差 $\hat{\Delta}_{ij}(k, t)$ 可以进一步修正灰色关联系数 $\hat{\xi}_{ij}(k)$ ：

$$\hat{\xi}_{ij}(k) = \frac{\min_i \min_j \min_k \hat{\Delta}_{ij}(k) + \rho \max_i \max_j \max_k \hat{\Delta}_{ij}(k)}{\hat{\Delta}_{ij}(k) + \rho \max_i \max_j \max_k \hat{\Delta}_{ij}(k)} \quad (11)$$

在已知灰色关联矩阵的情况下，判断航迹能否正确关联的方法为：采取全局最优判断准则的方法，首先要先确定关联门限值 λ ，一般 $0.5 \leq \lambda \leq 1$ ，当 γ_{ij} 的值超过 λ 值时才能确保航迹能够正确关联。其次将灰色关联矩阵中所有小于门限 λ 的灰色关联度置 0。然后使灰色关联矩阵中每 1 行或每 1 列最多只有 1 个值被采用，即矩阵中最大值的那 1 行与那 1 列也许会被关联。如果矩阵里最大值处于第 i_0 行第 j_0 列，则传感器 1 测得的第 i_0 条航迹与传感器 2 测得的第 j_0 条航迹相关联并且除去灰色关联矩阵的第 i_0 行 j_0 列之外的其他数据全部置 0，该过程一定要确保全部被关联的数据之和达到最大。最后当灰色关联矩阵存在非零元素时重复全局最优分配算法，直至灰色关联矩阵的所有元素全部为 0。

4 仿真试验

仿真参数设置：假设雷达传感器 1,2 对应的距离坐标为 (125 km, 125 km), (235 km, 130 km)，雷达传感器 1,2 的距离误差为 170 m, 180 m 以及角度误差均为 0.3° 。假设雷达传感器扫描环境中存在 6 个目标，且 2 个传感器均可以扫描到这 6 个目标。令起始目标距离坐标点在 (0,0), (380 000,0), (380 000,270 000), (0,270 000) 区域内正态分布，初始速度和初始航向分别在 $4 \sim 1\,200$ m/s 和 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布。目标交叉飞行情况下，雷达传感器观测数据如图 1 所示，雷达传感器滤波估计数据如图 2 所示。

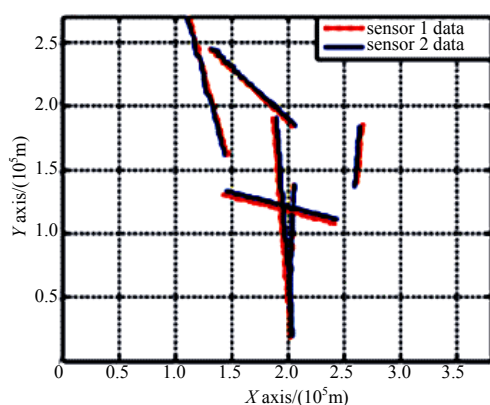


Fig.1 Observation data of radar
图 1 雷达观测数据

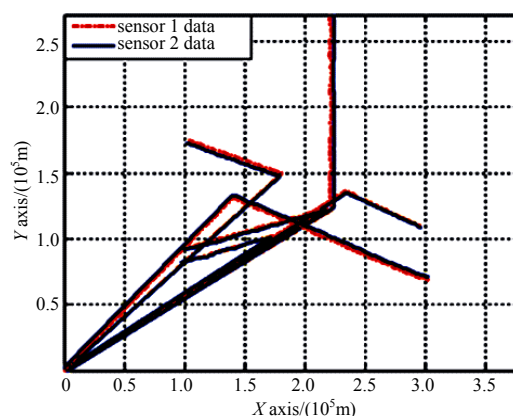


Fig.2 Radar filter estimation data
图 2 雷达滤波估计数据

假设灰色关联度门限值为 0.6，分辨系数 ρ 取值为 0.5，仿真 20 步，取 10~20 步来观测正确关联概率与错误关联概率，仿真结果如图 3、4 所示。由图 3、图 4 可得，特征信息辅助的序贯灰色关联法在处理航迹交叉关联方面效果较好，在 6 条航迹存在交叉情况下，航迹正确关联概率均在 80% 以上，且趋于 90%，远高于特征灰色关联法以及传统的灰色关联法，特征信息辅助的序贯灰色关联法让密集杂波条件下多目标航迹关联方面的问题得到了极大的改善。

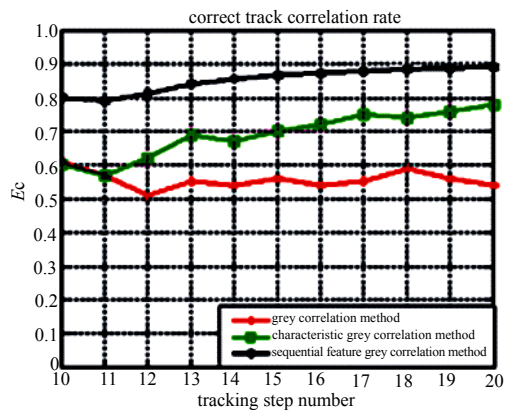


Fig.3 Accuracy probability curves of Track Association
图 3 航迹关联正确概率曲线图

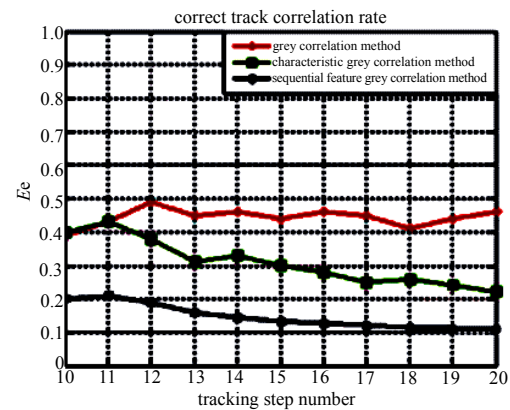


Fig.4 Error probability curves of Track Association
图 4 航迹关联错误概率曲线图

5 结论

本文提出的基于特征辅助信息灰色航迹关联算法,充分利用了雷达传感器扫描到量测的有用信息,对解决关于航迹关联模糊的问题很有帮助。该算法在航迹关联领域上特别当处于高密度杂波环境的条件下,能够取得较好的效果。

参考文献:

- [1] 谭学瑞,邓聚龙. 灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J]. 统计研究, 1995(3):46-48. (TAN Xuerui,DENG Julong. Gray relational analysis:new method of multi-factor statistical analysis[J]. Statistical Research, 1995(3):46-48.)
- [2] 关欣,孙祥威,何友. 基于灰关联度和距离的特征关联算法研究[J]. 雷达科学与技术, 2013,11(4):363-367. (GUAN Xin,SUN Xiangwei,HE You. Study on feature correlation algorithm based on gray relational degree and distance[J]. Radar Science and Technology, 2013,11(4):363-367.)
- [3] 徐进华. 基于灰色系统理论的数据挖掘及其模型研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009. (XU Jinhua.Data mining based on gray system theory and its model research[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2009.)
- [4] HE X F,THARMARASA R,KIRUBARAJAN T. Modified murty's algorithm for diverse multi target top hypothesis extraction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013,49(1):603-609.
- [5] 孙玉刚. 灰色关联分析及其应用的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007. (SUN Yugang. Gray correlation analysis and its application[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.)
- [6] 宋波,何世彪,隋静文,等. 基于特征分析算法的变换域通信系统接收技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):395-401. (SONG Bo,HE Shibiao,SUI Jingwen,et al. Transform domain communication system based on feature analysis algorithm receives technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):395-401.)
- [7] 温丽华,黄成哲. 基于灰色关联分析的系统优势分析[J]. 黑龙江工程学院学报, 2003,17(2):41-43. (WEN Lihua,HUANG Chengzhe. Study on system superiority based on gray relational analysis[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Engineering, 2003,17(2):41-43.)
- [8] THURAIAPPAN S,TAT J C,SANJEEV A,et al. A multiple hypothesis tracker for multi target tracking with multiple simultaneous measurements[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013,7(3):448-459.
- [9] CHEN Ying,CHENG Zhen,WEN Shuliang. Feature aided Gaussian mixture probability hypothesis density filter with modified 2D assignment[C]// 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. Sharad Nagappa Daniel Clark:IEEE, 2011:800-803.